

JATE Kibernetikai Laboratorium

Kibernetikai és számítástechnikai módszerek alkalmazása
a kapilláris keringés vizsgálatában

Hantos Zoltán, Hunya Péter

A vérkeringés egyes területeinek specifikus áramlási viszonyait vizsgálva, mindegyik esetén megadható néhány fő strukturális paraméter, mely az illető érterület jellegzetes áramlási képéért felelős. Így például az artériás rendszerben az érpályák hydrodynamikai ellenállásán kívül döntő jelentősége van az erek tágulékonyságának, valamint a folyadékoszlop tehetetlenségének. A vénás rendszer fő jellegzetessége pedig a kollapszibilis viselkedés. A kapilláris rendszereket tekintve, legszembetűnőbb az óriási falfelület, mely különböző értékű permeabilitással rendelkezik a kapillárisokban áramló vér egyes komponenseire. A többi érpályához képest itt tehát a szelektív permeabilitásnak döntő szerepe van az áramlási kép kialakításában.

A kapillárisok specifikus áramlási viszonyainak vizsgálatánál a strukturából következő - főleg mérés-technikai - problémák miatt megítélésünk szerint jogos modellezési eljárások használata.

A modellalkotás első fázisa a hálózat geometriájának leegyszerűsítése. Ezzel tulajdonképpen egy elvi hydrodynamikai modellt nyerünk. A kapillárisok változatos konfigurációja miatt bizonyos megfontolások után a hálózatot egyetlen csővel helyettesítő modellhez juthatunk. Az egyszerűsítés elve röviden az, hogy bármely hálózat azonos kapilláris nyomású keresztmetszetei egy-egy ekvipotenciális felületen helyezkednek el; egy ilyen felületen található kapilláris csőelemek hydrodynamikai ellenállásának parallel egyesítésével megkapjuk a modell elemi hosszúságú szakaszának ellenállását. A kerüle-

tek összegének és az elemi hosszának szorzata pedig a modell minden pontjában a filtráló összfelületet adja meg. A modell hossz tengelye mentén tehát elvileg felvehető a fenti értékekből számítható paraméterek /hydrodinamikai ellenállás, hydrodinamikai konduktivitás/ változása. Így tehát egy elosztott paraméterű hydrodinamikai rendszeret nyerünk, melyben a paraméterek r , g / ráadásul helyfüggőek. Az r/x / és g/x / függvényekre vonatkozóan nem rendelkezünk adatokkal, így egyszerűsítő feltéttelezésekkel éltünk.

A kapilláris nyomás és - a filtrációs-reszorpciós folyadékmozgások miatt - az intravascularis áramlásintenzitások, valamint - ugyancsak a transmuralis folyadékforgalom következtében - a plazma onkotikus nyomása a modell hossz tengelye mentén pontról-pontra változnak. A modell áramlási viszonyait így nemlineáris differenciálegyenletek írják le. Például az axialis áramlásintenzitásra felírt elsőrendű nemlineáris differenciálegyenlet a sok egyszerűsítő feltétellel ellenére sem oldható meg egzakt módon. Numerikus megoldásokat számítógép segítségével, Runge-Kutta módszerrel nyertünk. Bár az eredmények rendkívül hasznosnak bizonyultak bizonyos paraméterek szerepének megítélésében, ismertetésükre nem térünk ki.

Az előzőekben vázolt modell korlátai tették indokolttá, hogy más leírási módszerhez folyamodjunk.

Tekintsük a kapilláris hálózat egy elemi szakaszát: legyen az elemi szakasz bemenetén a vér áramlásintenzitása f' , különválasztva a plazma-proteinek áramlásintenzitása y' , a szakasz kimenetén ugyanezek f ill. y . A szakaszon kifiltrált folyadék áramlásintenzitását jelöljük F -fel, az érfalon átlépő fehérjék áramlásintenzitását pedig Y -nal. A szakasz áramlási állapotát még a következő mennyiségekkel jellemezhetjük: hydrostatikus kapilláris nyomás a bemeneten, ill. a kimeneten p' és p /, az átlagos fehérjekoncentrációból számítható k kolloidozmotikus nyomás, és a szakaszban áramló vér viszkozitásától függő r hydrodinamikai ellenállás. Megadhatók továbbá a fal-paraméterek /permeabilitások, diffúziós állandók, stb., melyeket a szakaszon belül állandónak tekintünk/.

A következőkben az elemi fizikai rendszert leíró összefüggések precíz megadását mellőzve, néhány megfontolást ismertetünk. Az áramlásintenzitások közötti összefüggéseket a kontinuitási egyenletek írják le:

$$\begin{aligned} f &= f' - F \\ y &= y' - Y, \end{aligned}$$

ahol F a Starling-elmélet alapján:

$$F = g \left[\frac{1}{\bar{p}} - \frac{P}{k} - \frac{1}{K} \right],$$

itt P ill. K az interstitialis tér hydrostatikus ill. onkotikus nyomása, $\bar{p} = 0.5/p' + p$ a szakasz átlagos hydrostatikus nyomása, g a felfelület vízre és vízben oldott anyagokra vonatkozó permeabilitása.

A falon átjutó fehérjék áramlásintenzitása pedig függvénye a b belső és B külső fehérjekoncentrációnak, valamint a filtrációs áramlásintenzitásnak:

$$Y = d_1/b - B/ + d_2 F.$$

A plasma onkotikus nyomása az alábbi empirikus összefüggés /Landis, E. M., Pappenheimer, J. R., 1963./ szerint függ a szakasz proteinkoncentrációjától:

$$k = a_1 b + a_2 b^2 + a_3 b^3.$$

A szakasz hydrodynamikai ellenállása exponenciális függvénye a haematokrit-értéknek /Barras, J. P., 1969/ :

$$r = r_0 e^{cf_H/f}.$$

Végül a szakaszra érvényes a

$$\Delta p = r f$$

és a

$$p' = p + \Delta p$$

összefüggés, ahol Δp a szakasz hydrostatikus nyomásesése.

Az elemi szakaszt ki- és bemenetekkel rendelkező egységként is feltüntethetjük /1. ábra/

Ilyen elemi homogén szakaszokból állítottuk össze a modellt. Az összeállítást tulajdonképpen az egyes blokkok közötti kapcsolat megadása jelenti. A realizációnál a blokkok egyetlen soros láncolatát képeztük, tehát a modell geometriája szempontjából visszakanyarodtunk a csőmodellhez, csak nem elosztott paraméterű, hanem homogén szakaszokból álló, vagyis koncentrált paraméterű aktív rendszert képeztünk. /2. ábra/

Az egyes blokkok a következőképpen illeszkednek egymáshoz: az egyik szakasz kimenő áramlásintenzitásai azonosak a következő bemenő értékeivel. Hasonlóan a blokkok illeszkedő oldalain a ki- és bemeneti nyomások is azonosak.

Mindegyik blokk kapcsolatban van a környezetet, azaz az interstitiumot reprezentáló blokkal. A kapcsolat kölcsönös: az interstitium blokkja felveszi az egyes blokkok transmuralis áramlásintenzitásait, képezi azok eredőjét, valamint az interstitiumból történő elvezetés karakterisztikája segítségével az interstitialis hydrostatikus nyomást. E két nyomásértéket minden egyes blokk bemenetére visszaadja.

E blokkdiagramon látható modellt leírhatjuk formálisan, mint az M_i automatákból álló S rendszert. Az

$$M_i / A_i, X_i, Y_i, \delta_i, \lambda_i / , \quad i=1, 2, \dots, N$$

automaták az elemi homogén szakaszoknak, az M_{N+1} automata pedig az interstitialis térnek felel meg. A_i az állapotok, X_i a bemeneti, Y_i a kimeneti mennyiségek halmaza, a δ_i függvény az automata állapotát határozza meg a bemenetekből, míg a λ_i függvény a kimeneteket szolgáltatja a bemenetekből és az állapotokból. Az egyes automatákat a relációk R halmaza kapcsolja össze az $S/M, R/$

rendszerre. Ezen S rendszer szimulációját végeztük számítógép segítségével.

A szimulációnál egy fiktív kapilláris hálózatot tekintünk, melynek adatait a humán szervezet megfelelő mennyiségeinek /véráramlás-intenzitás, kapilláris-felszín/ tizedrészére vettük fel.

A szimuláció során célunk azon egyensúlyi állapotok megkeresése volt, melyek bizonyos környezeti feltételekhez /bemenő áramlásintenzitás, vénás oldali nyomás, stb./, valamint belső paraméter-értékekhez tartoznak.

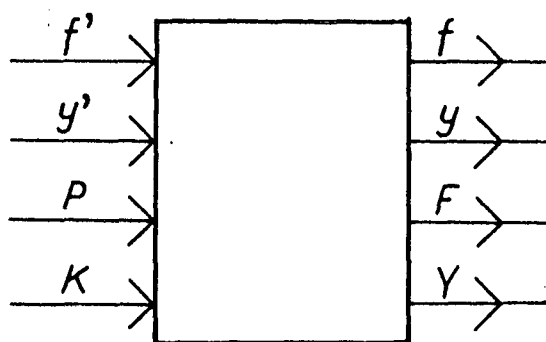
A 3. ábra néhány jellegzetes mennyiség változását mutatja a hely függvényében, a modell egy stationer állapota esetén. Figyelemreméltó a k_1 onkotikus nyomás erőteljes változása a modell mentén. /3. ábra/

Az eredmények egy részét össze tudtuk vetni fiziológiai kísérletek eredményeivel. Ezeknél - pl. az eredő filtrátum függése a vénás nyomástól, valamint a plazmafehérje-koncentrációtól - egyezést tapasztaltunk. A szimuláció eredményei közül kiemelnénk a P interstitialis nyomás függését a g permeabilitás értékétől, különböző fehérjére vonatkozó áteresztőképesség-értékek mellett /4. ábra/.

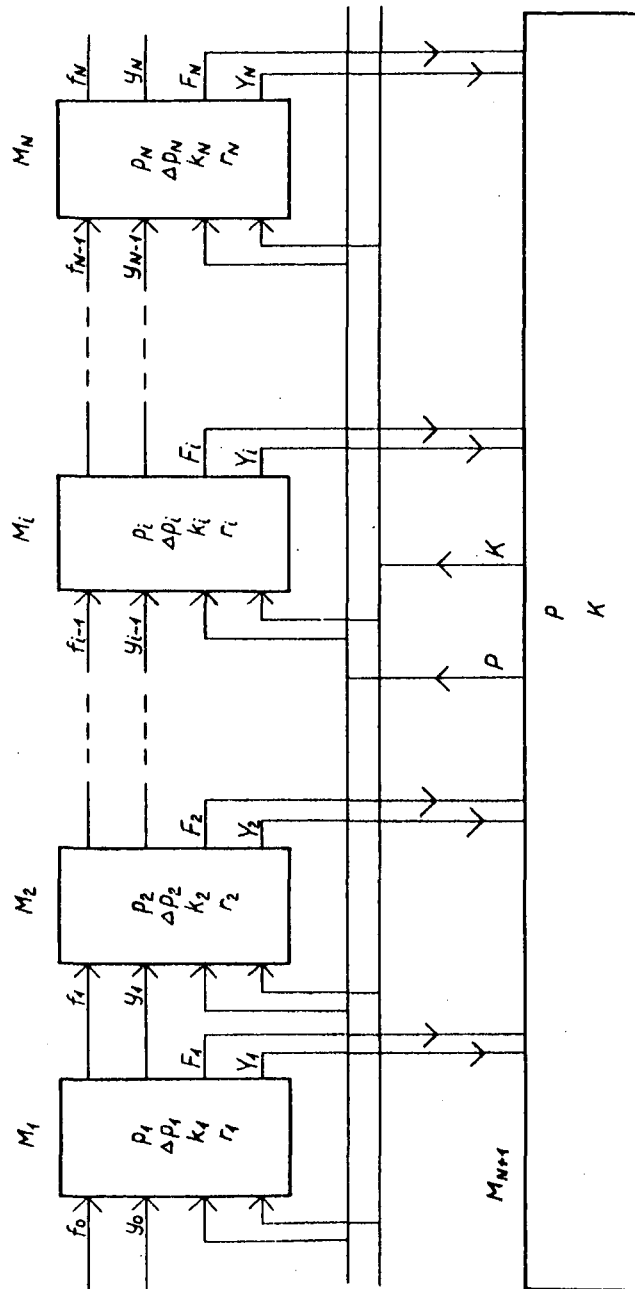
I R O D A L O M

Barras, J.-P.: Les propriétés rhéologiques du sang dans les capillaires de très petit diamètre, Angéiologie, XXI, 1, 43-53, /1969./

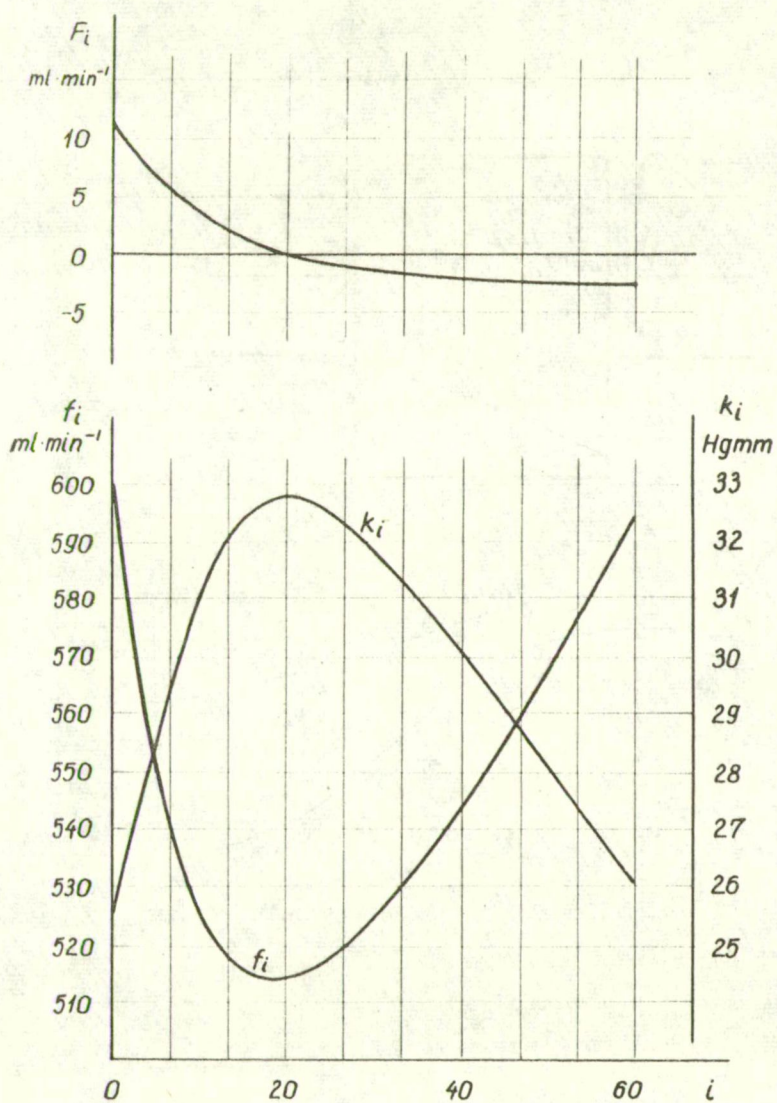
Landis, E. M., Pappenheimer, J. R. : Exchange of substances through capillary walls. Handbook of Physiology, sect. 2, vol. II., Amer. Physiol. Soc., Washington, 961-1034, /1963./



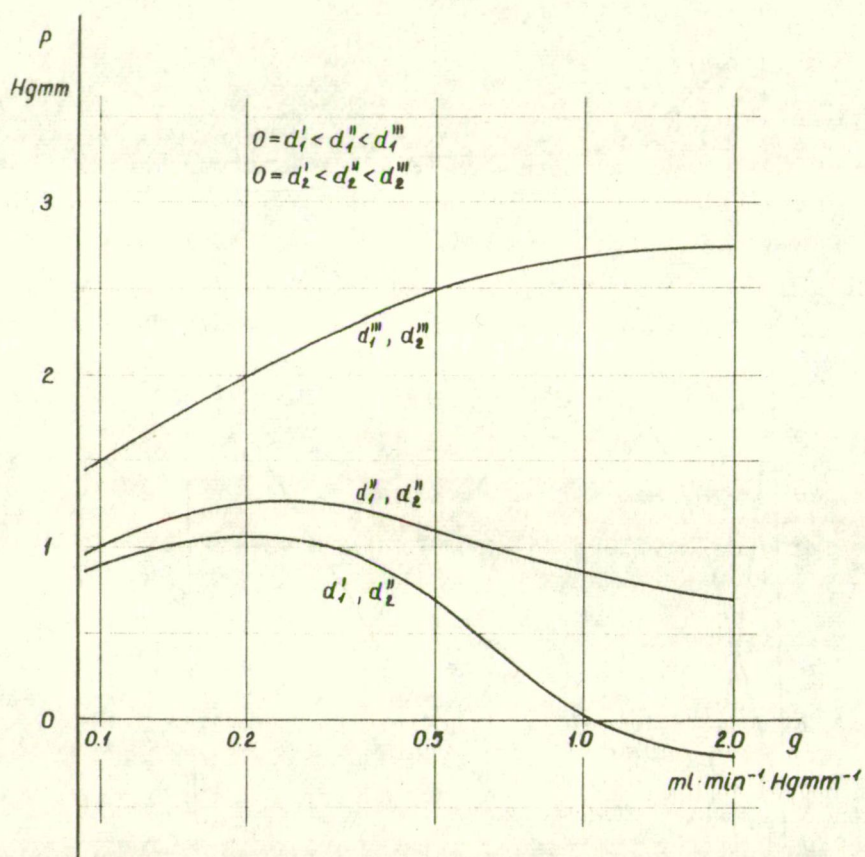
1. ábra



2. ábra



3. ábra



4. ábra